



## بررسی تجربی و عددی فرآیند جدید اطوکشی محدودشده با قابلیت حصول کاهش ضخامت بسیار بالا

محسن خودستان<sup>1</sup>، قادر فرجی<sup>2\*</sup>، کارن ابری نیا<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

\* تهران، صندوق پستی 11152-566، ghfaraji@ut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 22 آبان 1394

پذیرش: 08 دی 1394

ارائه در سایت: 25 بهمن 1394

کلید واژگان:

اطوکشی محدود شده

تنش فشاری

نسبت کاهش ضخامت بالا

آزمایش تجربی

شبیه سازی

### چکیده

اطوکشی یکی از فرآیندهای متداول شکل دهی فلزات می باشد که برای تولید قوطی های دیواره نازک و قطعات با ضخامت یکنواخت متعاقب فرآیند کشش عمیق به کار می رود. در فرآیندهای اطوکشی متداول نقاط ضعفی از جمله پایین بودن نسبت کاهش ضخامت (TRR) وجود دارد که برای افزایش TRR نیاز به آنیل بین پاسی و افزایش تعداد مراحل اطوکشی می باشد. اخیراً، توسط نویسندگان این مقاله روش جدید اطوکشی محدود شده به منظور دستیابی به نسبت کاهش ضخامت بسیار بالا ارائه شده است که مشکلات روش سنتی را حل نموده است. این روش براساس تنش فشاری می تواند به نسبت کاهش ضخامت بالاتر دست یابد بدون این که نیازی به فرآیندهای اضافی مانند اطوکشی چند مرحله ای و آنیل بین مراحل مختلف باشد. در آغاز فرآیند اطوکشی محدود شده، سنبه تحت نیروی پرس قرار می گیرد و مواد برای کاهش ضخامت از سطح بیرونی دیواره فنجان تحت فشار قرار می گیرند. در این مقاله شبیه سازی فرآیند با نرم افزار آباکوس صورت گرفته و پارامترهای موثر بررسی شده است. نتایج شبیه سازی نشان داد که با افزایش ضریب اصطکاک نیروی فرآیند افزایش می یابد. همچنین شبیه سازی ها نشان دادند که حالت تنش در ناحیه شکل دهی در فرآیند اطوکشی محدود شده به صورت کامل فشاری است، در حالی که حالت تنش در فرآیند اطوکشی سنتی کششی است. بنابراین مولفه های فشاری تنش مشکلات شکل دهی را کاهش می دهد و کاهش ضخامت های بسیار بالا در روش اطوکشی جدید قابل دستیابی است. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که استحکام کششی و سختی پس از اطوکشی فنجان کشش عمیق شده افزایش یافته است.

## Experimental and numerical investigation of a new constrained ironing process with capability of extra high thickness reduction

Mohsen Khodsetan · Ghader Faraji\* · Karen Abrinia

Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

\* P.O.B. 11152566, Tehran, Iran. ghfaraji@ut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 13 November 2015

Accepted 29 December 2015

Available Online 14 February 2016

### Keywords:

Constrained ironing  
compressive stress  
higher thickness reduction ratio  
experiments  
FEM

### ABSTRACT

Ironing is a conventional metal forming process for producing thin walled cans with uniform thickness components manufactured from deep drawn cups. The most important drawback of the conventional ironing is that the lower thickness reduction ratio (TRR) requires annealing process and multi stage ironing. Recently, a new ironing process named constrained ironing was presented by the current authors to achieve an extra TRR to solve the conventional ironing problems. This process, which is based on the compressive stresses, makes it possible to achieve high TRR without interruption for additional processing such as multi-stage ironing and annealing. In this paper FEM simulation was performed to investigate the effective parameters. The simulation results showed the process load increases with increasing the friction coefficient. Also, the state of the stresses is fully compressive in constrained ironing process while it is tensile in the conventional ironing method. Thus, compressive stress components minimize formability problems, and higher thickness reduction ratio is achievable in the new ironing method. Moreover, experimental results showed that the tensile strength and hardness increased after constrained ironed of the deep drawn cup.

### 1- مقدمه

ضخامت بهتر مورد استفاده قرار می گیرد. پژوهش های بسیاری بر روی پارامترهای موثر در فرآیند اطوکشی از جمله هندسه قالب، نوع روان کار مصرفی و نسبت کاهش ضخامت به صورت تجربی، عددی و تحلیلی انجام شده است [3]. یکی از فاکتورهای مهم در فرآیند اطوکشی نسبت کاهش

اطوکشی به عنوان یکی از روش های پر کاربرد شکل دهی فلزات به صورت گرم یا سرد می باشد که برای تولید قطعات استوانه ای جدار نازک پس از عملیات کشش عمیق مورد استفاده قرار می گیرد [1، 2]. عملیات اطوکشی معمولاً متعاقب فرآیند کشش عمیق برای ساخت قطعات با ارتفاع بیشتر و با توزیع

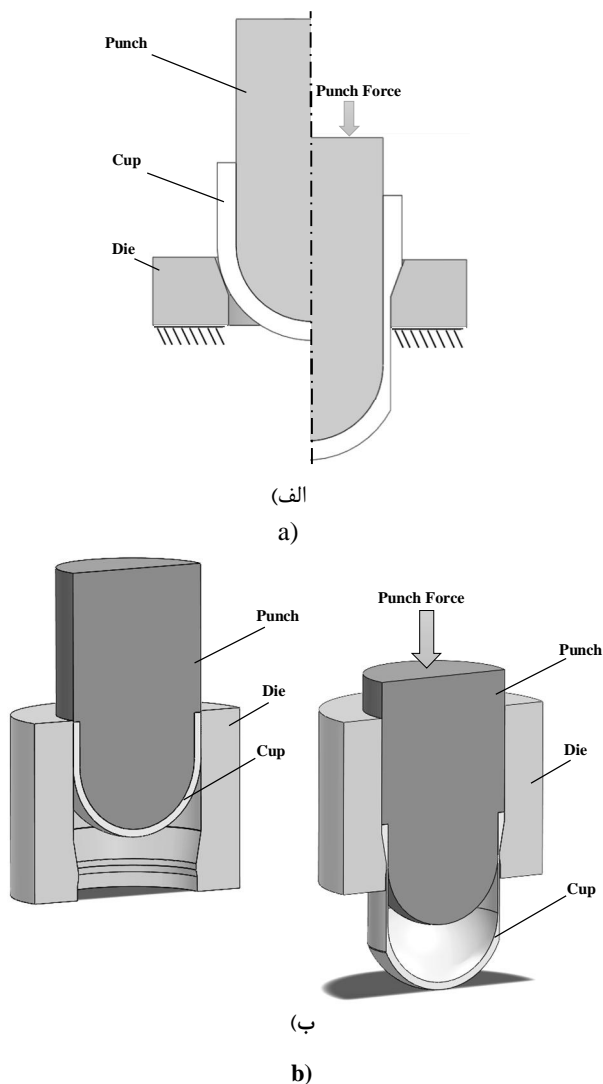
Please cite this article using:

M. Khodsetan · Gh. Faraji · K. Abrinia, Experimental and numerical investigation of a new constrained ironing process with capability of extra high thickness reduction, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 140-146, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## 2- اساس روش اطوکشی محدود شده

در فرآیند سنتی اطوکشی که در شکل 1 (الف) نشان داده شده است، سنبه برای هدایت فنجان کشش عمیق شده به ناحیه شکل‌دهی جهت کاهش ضخامت دیواره به سمت پایین پرس می‌شود. در این روش سنبه با اعمال تنش کششی بر دیواره فنجان باعث شکل‌دهی و کاهش ضخامت در منطقه تغییر شکل می‌شود. بنابراین در صورتی که نسبت کاهش ضخامت بیش از حد مجاز (بیش از حدود 30%) انتخاب شود گلوبی شدن و پارگی در دیواره رخ می‌دهد. فرآیند جدید اطوکشی محدود شده در شروع و در حین فرآیند به صورت شماتیک در شکل 1 (ب) نشان داده شده است. فنجان کشش عمیق شده در شروع فرآیند در فاصله بین سنبه و قالب قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل 1 (ب) نیز مشاهده می‌شود فنجان از اطراف محدود به قالب و سنبه می‌باشد. لذا هنگامی که فرآیند آغاز می‌شود مواد فنجان تحت تنش‌های فشاری در اثر نیروی پرس قرار می‌گیرد در حالی که از همه جهات بجز ناحیه خروج ماده توسط قالب و سنبه مهار می‌شود. سپس سنبه اطوکشی به سمت پایین حرکت می‌کند و فنجان کشش عمیق شده را برای کاهش ضخامت به ناحیه شکل‌دهی هدایت می‌کند. در نهایت ضخامت دیواره فنجان در هنگام خروج از قالب نازک شده و فنجان با طول بلند شکل می‌گیرد.



**Fig. 1** A schematic of a) conventional ironing and b) constrained ironing

شکل 1 الف) شماتیک فرآیند اطوکشی سنتی و ب) اطوکشی محدود شده

ضخامت<sup>1</sup> (TRR) می‌باشد که این مقدار در روش معمول و سنتی اطوکشی حدود 30 درصد می‌باشد که بسته به جنس قطعه کار و شرایط فرآیند می‌تواند مقداری افزایش یا کاهش یابد. به دلیل همین محدودیت در روش سنتی برای تولید فنجان با نسبت بالای کاهش ضخامت، اطوکشی چند مرحله‌ای استفاده می‌شود [4]. در اطوکشی چند مرحله‌ای، هر یک از مراحل مقداری از نسبت کاهش ضخامت کل موردنیاز را ایجاد می‌کنند. به هر حال افزایش تعداد مراحل به معنی افزایش تعداد قالب‌ها و ایستگاه‌های کاری و متعاقب آن افزایش هزینه تولید می‌باشد. لذا هر فرآیند اطوکشی جدیدی که بتواند مقدار نسبت کاهش ضخامت بالایی را در یک قالب انجام دهد بسیار مفید و موثر خواهد بود. مشکل دیگری که فرآیند اطوکشی چند مرحله‌ای با آن مواجه است افزایش کار سختی در هر مرحله اطوکشی می‌باشد. آنیل کردن بین مراحل اطوکشی جهت حذف کار سختی باعث افزایش شکل‌پذیری و حذف تنش‌های پسماند مورد استفاده قرار می‌گیرد [5-7]. پژوهش‌های بسیاری برای کاهش تعداد مراحل اطوکشی (با افزایش نسبت کاهش ضخامت) و حذف آنیل بین مراحل انجام شده است [8,9]. کامپوس و ناردین<sup>2</sup> [10] شکل‌پذیری را با تبدیل تنش کششی به تنش فشاری در ناحیه شکل‌دهی بهبود بخشیدند. آن‌ها یک نیروی فشاری بر روی لبه فنجان کشش عمیق شده اعمال کرده و توانستند به کاهش ضخامت 35% دست یابند. دلایره و مانتیمونت<sup>3</sup> [11] حداکثر نسبت قابل دستیابی در کاهش ضخامت دیواره فنجان ساخته شده از فولاد ضدزنگ، در یک مرحله اطوکشی را مورد مطالعه قرار دادند. تیروش<sup>4</sup> و همکاران [12] اطوکشی هیدرواستاتیک را ارائه دادند که باعث دستیابی به نسبت کاهش ضخامت در حدود 56% شدند. این روش به دلیل مشکلات تأمین فشار سیال بالا در حدود 600 مگاپاسکال خیلی مورد توجه واقع نشد. شیرازی<sup>5</sup> و همکاران [7] جهت غلبه بر نقاط ضعف روش‌های اطوکشی، روش هیدرواطوکشی را ارائه دادند. این روش بر مبنای فشار هیدرواستاتیک روغن و نیروی لودر می‌باشد که می‌تواند به نسبت کاهش ضخامت در حدود 70 درصد در یک مرحله اطوکشی دست یابد. اگرچه این روش برخی مشکلات موجود را پوشش داد اما کنترل دقیق پارامترهایی از قبیل فشار سیال، نیروی لودر و سنبه مشکل می‌باشد. همچنین نیاز به تجهیزات پیچیده از دیگر نقاط ضعف روش هیدرو اطوکشی بود. خودستان<sup>6</sup> و همکاران [13] (نویسندگان مقاله حاضر) به تازگی برای غلبه بر مشکلات روش هیدرواطوکشی، روش اطوکشی محدود شده را ارائه دادند. این روش بر مبنای تنش فشاری در ناحیه شکل‌دهی می‌باشد که قابلیت اطوکشی با کاهش ضخامت‌های بسیار بالا را دارا می‌باشد. آن‌ها موفق شدند کاهش ضخامت در حدود 80% را بدست آورند که تاکنون حاصل نشده بود.

در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی اطوکشی محدود شده به‌عنوان روشی جدید و ساده برای تولید قوطی‌های استوانه‌ای دیواره نازک با نسبت کاهش ضخامت بسیار بالا تنها در یک مرحله اطوکشی انجام شده است و تأثیر ضربه اصطکاک بر این فرآیند مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین مقایسه‌ای بین روش جدید و روش سنتی اطوکشی انجام گرفته است. آزمایشات تجربی هم جهت صحت‌سنجی نتایج عددی انجام پذیرفت.

1- Thickness Reduction Ratio (TRR)

2- Kampus and Nardin

3- Delarbre and Montmitonnet

4- Tirosh

5- Shirazi

6- Khodsetan

مطابق آزمون عملی در شکل 3 قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می‌شود ضریب اصطکاک تأثیر بسیار زیادی بر نیروی فرآیند دارد و با افزایش ضریب اصطکاک، نیروی موردنیاز به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

جدول 1 خواص آلومینیوم خالص و پارامترهای فرآیند

Table 1 The pure Al properties and process parameters

مقدار	پارامتر
70 مگاپاسکال	مدول الاستیسیته (E)
0.33	ضریب پواسون ( $\nu$ )
2.70 گرم/سانتی متر <sup>3</sup>	چگالی ( $\rho$ )
2.35 میلی متر	ضخامت اولیه ( $t_i$ )
84 میلی متر	قطر بلنک اولیه
10 درجه	زاویه قالب ( $\alpha$ )
80 درصد	نسبت کاهش ضخامت
0.1, 0.8, 0.075, 0.05, 0.01	ضریب اصطکاک ( $\mu$ )

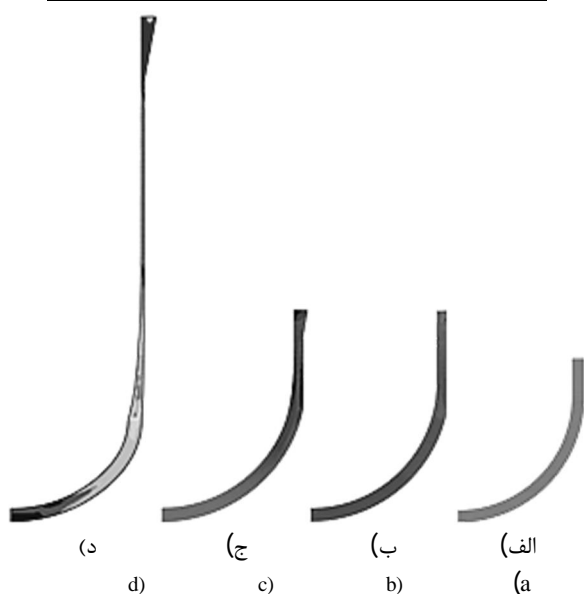


Fig. 2 The models of a) deep drawn cup, b) conventional ironed cup, c) constrained ironed cup with 30% TRR and d) 80% TRR

شکل 2 مدل‌های (الف) فنجان کشش عمیق شده، (ب) فنجان اطو شده با روش سنتی، (ج) فنجان اطوکشی محدود شده با 30% TRR و (د) 80% TRR

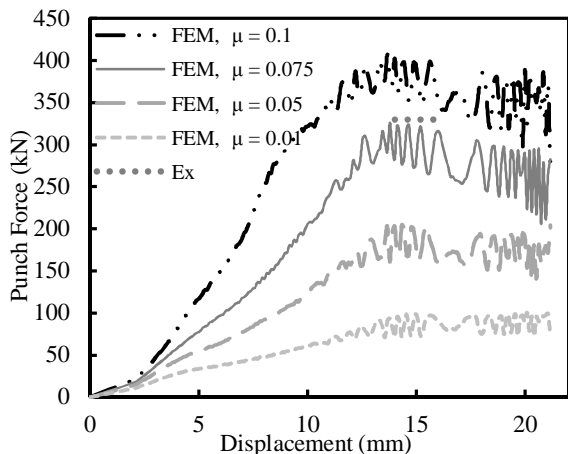


Fig. 3 load-displacement curves of the finite element simulation and experiment

شکل 3 منحنی‌های نیرو-جابجایی فرآیند حاصل از شبیه‌سازی اجزا محدود و آزمایش تجربی

سرعت نازک شدن مواد از سرعت حرکت سنبه بیشتر می‌باشد، بنابراین بین سنبه و انتهای فنجان فاصله ایجاد می‌شود. با ادامه یافتن فرآیند این فاصله افزایش می‌یابد به گونه‌ای که دیگر هیچ تنش کششی به دیواره اعمال نمی‌شود و در نتیجه می‌تواند به نسبت‌های کاهش ضخامت بیشتری دست یافت.

### 3- آزمایش‌های تجربی

یک بلانک ورق دایره‌ای از آلومینیوم خالص تجاری با ضخامت 2.5 میلی‌متر و قطر 84 میلی‌متر برش خورده و سپس در دمای 415 درجه سانتی‌گراد به مدت 3 ساعت آنیل شد [7]. قطعات فنجان‌ی شکل با قطر خارجی 50 میلی‌متر و ارتفاع دیواره 15 میلی‌متر توسط قالب کشش عمیق تهیه شدند. قالب کشش عمیق و اطوکشی از فولاد ابزار ساخته شده و تا 50 راکول C سخت‌کاری شدند. از روان‌کار سولفید مولیبدن برای کاهش اصطکاک بین سطوح فنجان و قالب استفاده شد. عملیات اطوکشی با پرس فشاری هیدرولیک 60 تن در دمای اتاق انجام شد. برای بررسی ریزساختار از اجزایی با ترکیب H<sub>2</sub>O و HF، HBF<sub>4</sub> استفاده شده است. در روش الکترواچ جریان معادل 2 آمپر و ولتاژ 40 ولت به نمونه آلومینیومی اعمال شده است. همچنین میکروسکوپ نوری برای بررسی ریزساختار به کار گرفته شده است. جهت بررسی خواص مکانیکی، آزمایش کشش و میکرو سختی‌سنجی ویکرز در جهت محوری صورت گرفت.

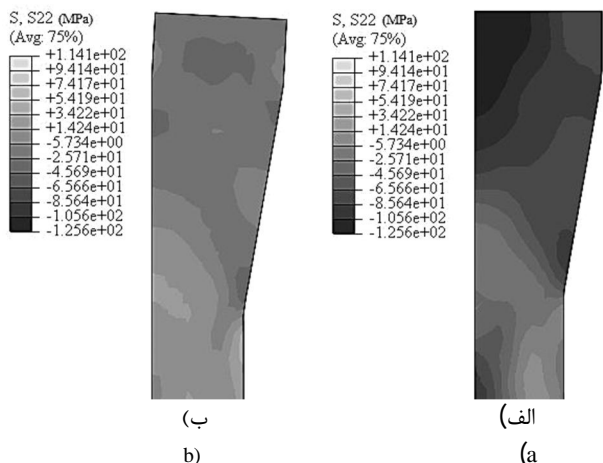
### 4- شبیه‌سازی اجزای محدود

فرآیند با استفاده از نرم‌افزار آباکوس<sup>1</sup> در شرایط متقارن محوری<sup>2</sup> شبیه‌سازی شد. قالب و سنبه به صورت قطعات صلب در نظر گرفته شده و فنجان کشش عمیق شده به صورت تقارن محوری با المان چهارضلعی، چهار نقطه‌ای و دوسویه‌ای<sup>3</sup> CAX4R با تعداد 2300 جزء مدل‌سازی شدند. به علت تغییر شکل زیاد از تکنیک مش‌بندی تطبیقی<sup>3</sup> جهت مش‌بندی مجدد اتوماتیک استفاده شد. جهت مقایسه وضعیت تنش در فرآیند اطوکشی محدود شده و اطوکشی سنتی در ناحیه تغییر شکل، شبیه‌سازی المان محدود با نسبت کاهش ضخامت 30 درصد انجام شد. خواص آلومینیوم معمولی، پارامترهای شبیه‌سازی و مقدار آن‌ها در جدول 1 آورده شده است. فنجان کشش عمیق مش زده شده، فنجان اطوکشی شده به روش سنتی و روش اطوکشی محدود شده با نسبت کاهش ضخامت 30 درصد جهت مقایسه و همچنین فنجان اطوکشی محدود شده با نسبت کاهش ضخامت 80 درصد در شکل 2 (الف)، (ب)، (ج) و (د) نشان داده شده است. علت مقایسه در نسبت کاهش ضخامت نسبت کاهش ضخامت 30 درصد اینست که امکان اطوکشی قطعه با نسبت کاهش بیش از 30 درصد وجود نداشت. منتها به منظور بررسی قابلیت‌های فرآیند اطوکشی محدود شده، شبیه‌سازی‌های مربوطه در نسبت کاهش ضخامت 80 درصد انجام پذیرفت.

### 5- نتایج و بحث

شبیه‌سازی المان محدود با ضرایب اصطکاک مختلف جهت تعیین نزدیک‌ترین حالت به شرایط آزمایشگاهی انجام شد. تأثیر اصطکاک بر نیروی موردنیاز فرآیند در زاویه قالب 10 درجه و نسبت کاهش ضخامت 80 درصد

1- Abaqus/Explicit  
2- axisymmetric  
3- adaptive meshing



**Fig. 5** The contour of axial stress for (a) constrained and (b) conventional ironing

شکل 5 کانتور تنش محوری برای (الف) فرآیند اطوکشی محدودشده و (ب) فرآیند اطوکشی سنتی

در روش‌های سنتی افزایش اصطکاک بین سنبه و قطعه کار راه‌حلی است که برای کاهش تنش کششی در دیواره فنجان ارائه شده است. روش اطوکشی محدود شده فاقد محدودیت‌های ذکر شده می‌باشد و به علت ماهیت کاملاً فشاری تنش در ناحیه تغییر شکل امکان تغییر شکل‌های شدید و نسبت بالای کاهش ضخامت فراهم گردیده است. در فرآیندهای شکل‌دهی در صورتی که همه مولفه‌های تنش فشاری باشند، مشکلات شکل‌دهی به حداقل می‌رسد [19]. تنش‌های فشاری باعث بسته شدن حفره‌ها و میکرو ترک‌های ریزساختاری در مواد فنجان می‌گردد و از روی دادن پدیده گلوبی جلوگیری می‌کند [10, 20, 21]. همچنین در شرایطی که تنش فشاری بر ناحیه تغییر شکل حاکم باشد، امکان شکل‌دهی موادی که شکل‌پذیری محدودی دارند نیز امکان‌پذیر می‌گردد. بنابراین، روش اطوکشی محدود شده پتانسیل شکل‌دهی مواد ترد با قابلیت شکل‌پذیری پایین را نیز دارد.

شکل 6 فنجان کشش عمیق شده و فنجان اطوکشی محدود شده را نشان می‌دهد. ارتفاع زیادتر در فنجان اطوکشی محدود شده نسبت به فنجان کشش عمیق شده به‌دست آمده است. این ارتفاع زیاد در دیواره بر اثر یک کاهش ضخامت قابل توجه در ضخامت دیواره فنجان کشش عمیق شده می‌باشد که پس از یک مرحله فرآیند اطوکشی محدود شده به‌دست آمده است. ضخامت اولیه فنجان کشش عمیق شده حدود 2.5 میلی‌متر می‌باشد که پس از اطوکشی به ضخامت 0.48 میلی‌متر رسیده است. از نقطه شروع تا نقطه پایان دیواره اطوکشی شده، توزیع ضخامت یکنواختی قابل مشاهده است که در طول 6 سانتی‌متر ارتفاع دیواره تolerانس  $\pm 0.02$  قابل مشاهده می‌باشد.

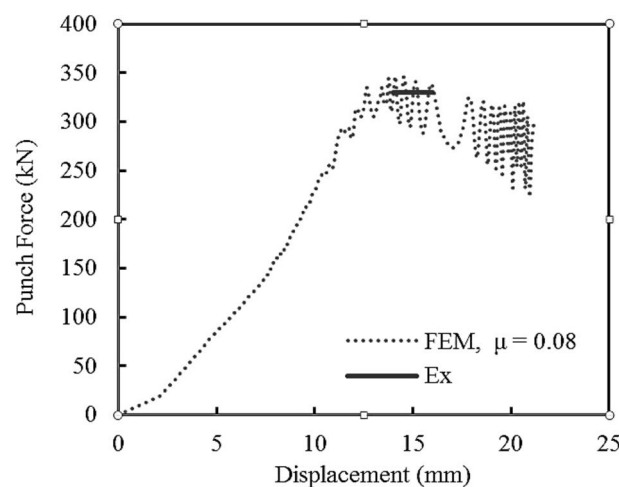
در کاربردهای صنعتی دستیابی به تolerانس‌های محدود از اهمیت بالایی برخوردار است که فرآیند اطوکشی محدود شده، ضمن قابلیت دستیابی به نسبت بالای کاهش ضخامت در حدود 80 درصد تنها در یک مرحله می‌تواند دقت ابعادی مطلوب را نیز ایجاد نماید. در این فرآیند، حد شکل‌دهی به حالت تنش در ناحیه تغییرشکل و دیواره فنجان پس از اطوکشی بستگی دارد. تنش‌های فشاری در دیواره فنجان امکان دستیابی به نسبت کاهش ضخامت بالاتری را فراهم می‌کنند [20]. در اطوکشی محدود شده، سنبه استوانه‌ای پله دار نیروی فشاری را بر دیواره فنجان اعمال می‌کند. این نیروی فشاری بالا باعث بهبود شکل‌پذیری و بسته شدن حفره‌هایی است که در طول فرآیند

با توجه به شکل 3 مشاهده می‌شود هنگامی که ضریب اصطکاک بین 0.075 و 0.1 می‌باشد، نیروی حداکثر حاصل از شبیه‌سازی با نیروی حداکثر آزمایش تجربی مشابه است. در ادامه، با توجه به این‌که نیروی حداکثر فرآیند در آزمایش تجربی 33 تن می‌باشد، شبیه‌سازی دیگری جهت پیدا کردن ضریب اصطکاک دقیق انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که در ضریب اصطکاک 0.08 نزدیک‌ترین حالت با نتایج آزمایشگاهی به‌دست می‌آید. شکل 4 تطابق نیروی حداکثر آزمایش تجربی و شبیه‌سازی صورت گرفته را نشان می‌دهد. ضریب اصطکاک 0.08 به‌دست آمده در فرآیند اطوکشی محدود شده تقریباً مشابه ضریب اصطکاکی است که برای فرآیند اطوکشی سنتی در مراجع [14-16] گزارش شده است.

مقایسه حالت تنش در ناحیه شکل‌دهی در شبیه‌سازی المان محدود فرآیند اطوکشی محدود شده و فرآیند اطوکشی سنتی در شکل 5 قابل مشاهده است. همان‌گونه که در شکل 5 (الف) نشان داده شده، وضعیت تنش برای اطوکشی محدود شده به‌طور کامل فشاری می‌باشد، در حالی که این وضعیت برای اطوکشی سنتی به‌طور کامل کششی است (شکل 5 (ب)). در روش‌های متداول اطوکشی هنگامی که محور پرس به سنبه فشار اعمال می‌کند، سنبه این فشار را به کف فنجان انتقال می‌دهد و باعث عبور مواد فنجان از ناحیه شکل‌دهی و کاهش ضخامت دیواره فنجان می‌شود. کل فشاری که توسط پرس فراهم می‌شود شامل دو بخش اساسی است که بخشی از آن درگیر نیروی اصطکاک شده و بخش اعظم آن به کف قطعه کار وارد می‌شود [17].

با توجه به این‌که در فرآیندهای شکل‌دهی در صورت وجود تنش‌های فشاری، ایجاد و رشد ترک‌ها و عیوب به تاخیر می‌افتد [18] لذا علت اصلی افزایش نسبت کاهش ضخامت در فرآیند اطوکشی محدود شده وجود تنش‌های فشاری در مقایسه با فرآیند سنتی می‌باشد.

فشار وارده به کف فنجان باعث ایجاد تنش کششی در دیواره فنجان می‌شود. تنش کششی مانع اصلی در دستیابی به کاهش ضخامت‌های بالاتر می‌باشد، زیرا باعث گلوبی در دیواره فنجان اطوکشی می‌شود. از دیگر محدودیت‌های تنش کششی ایجاد شده، انقباض فنجان اطوکشی شده و چسبیدن آن به سنبه و مشکلات جدا کردن آن می‌باشد [19].



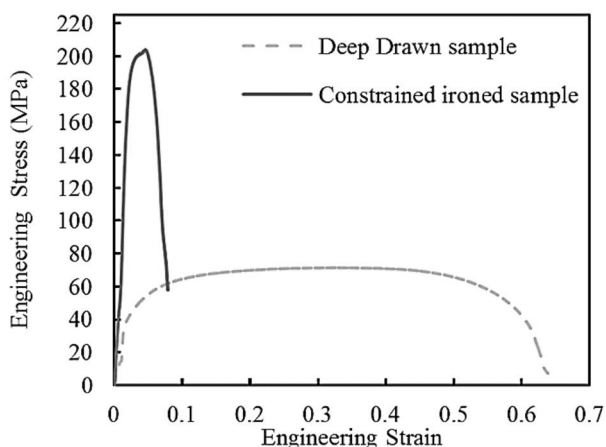
**Fig. 4** Equivalent friction coefficient FEM simulation with the experiment

شکل 4 ضریب اصطکاک معادل شبیه سازی اجزا محدود با آزمایش تجربی

سرد روی آلیاژهای آلومینیوم، تغییر شکل شدید و شکستن دانه‌ها می‌باشد که در مرز دانه‌ها به دلیل تشکیل ساختارهای سلولی و جدا از هم این اثر بسیار شدیدتر است. این ساختار لایه‌ای در فرآیندهایی نظیر نورد جمعی که در آن کاهش ضخامت ورق بالاست و کرنش بالایی به نمونه اعمال می‌شود نیز قابل مشاهده است.

شکل 8 منحنی تنش کرنش مهندسی که از نمونه آلومینیومی آنیل شده و اطوکشی محدود شده در دمای اتاق به دست آمده را نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است استحکام نمونه‌های اطوکشی محدود شده نسبت به نمونه آنیل شده به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. همچنین کاهش شکل‌پذیری و ازدیاد طول قابل توجه در اثر کار سختی برای نمونه‌های اطوکشی شده مشاهده می‌شود. شکل 9 استحکام نهایی، استحکام تسلیم و ازدیاد طول نمونه‌های اطوکشی شده و آنیل شده در مقایسه با یکدیگر را نشان می‌دهد. نمونه آنیل شده دارای استحکام کششی 71 مگاپاسکال با ازدیاد طول 63 درصد می‌باشد. به دلیل عملیات حرارتی آنیل قبل از فرآیند این میزان ازدیاد طول به دست آمده است. در نمونه اطوکشی شده، استحکام کششی تا مقدار 204 مگاپاسکال افزایش یافته است. این در حالی است که ازدیاد طول تنها 7 درصد می‌باشد. این مقدار بالا از استحکام، در هیچ یک از فرآیندهای اطوکشی به دست نیامده است. شیرازی و همکاران [7] برای همین مواد در فرآیند هیدرواطوکشی به استحکام کششی در حدود 145 مگاپاسکال و ازدیاد طول 7 درصد دست یافته‌اند. 27 درصد افزایش استحکام با همان ازدیاد طول 7 درصد در فرآیند اطوکشی محدود شده در مقایسه با هیدرو اطوکشی به دست آمده است [7] که ممکن است به دلیل تنش فشاری زیادی باشد که در تمام مواد توسط این فرآیند اعمال می‌شود.

توزیع سختی در امتداد دیواره فنجان آلومینیومی کشش عمیق شده و اطوکشی محدود شده در شکل 10 نشان داده شده است. میکروسختی در راستای افقی دیواره فنجان‌ها از نقطه "a" تا نقطه "b" اندازه‌گیری شده است. فنجان کشش عمیق شده دارای مقدار سختی 25 HV می‌باشد که پس از فرآیند اطوکشی محدود شده افزایش چشمگیری در میکروسختی به مقدار 85 HV نسبت به نمونه کشش عمیق شده به دست آمده است. این مقدار سختی در مقایسه با سختی نمونه هیدرواطوکشی افزایش 40 درصد داشته است [7]. عواملی که باعث این افزایش سختی شده‌اند مقدار کرنش بالایی است که در اثر تغییر شکل شدید، اعمال شده است. علاوه بر این در روش



**Fig. 8** Engineering stress-strain curves of deep drawn and ironed cups

شکل 8 منحنی تنش - کرنش مهندسی نمونه کشش عمیق و اطوکشی شده



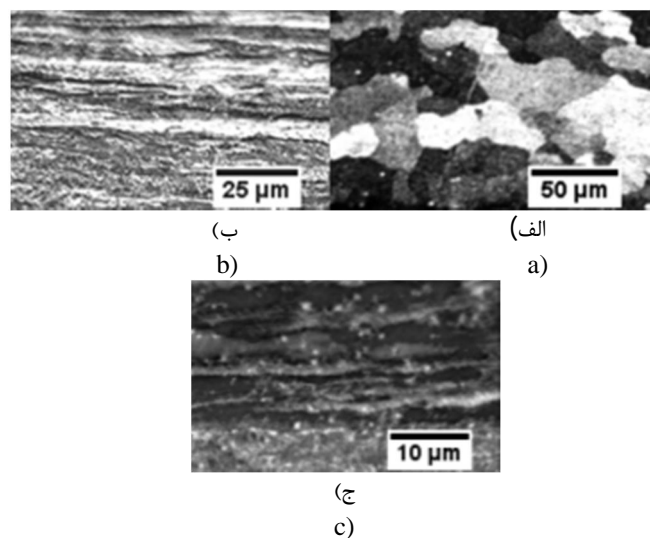
**Fig. 6** Deep drawn and ironed cup

شکل 6 فنجان کشش عمیق شده و اطوکشی شده

کشش ظاهر می‌شوند [10]. اعمال تنش‌های فشاری باعث بهبود جریان مواد در ناحیه شکل‌دهی می‌شود [22].

تصاویر ریزساختار نمونه‌های آنیل شده و اطوکشی محدود شده در شکل 7 قابل مشاهده می‌باشد. همان‌طور که در شکل 7 (الف) دیده می‌شود، در نمونه آنیل شده دانه‌های هم‌محور با اندازه تقریبی  $70\mu\text{m}$  توزیع شده‌اند. پس از فرآیند اطوکشی، با توجه به این‌که دیواره فنجان با کاهش ضخامت بالایی مواجه است و کرنش بالایی به ماده در ناحیه تغییر شکل وارد می‌شود، دانه‌های هم‌محور تحت تغییر شکل شدید قرار گرفته و به دانه‌های کشیده شده ریزتر تبدیل می‌شوند.

در اثر کار سرد به دلیل افزایش طول نمونه معمولاً کاهش ابعاد در یک یا دو بعد دیگر رخ می‌دهد و دانه‌های فلزی به سبب افزایش طول دچار کشیدگی می‌شود و به‌صورت لایه‌هایی روی هم قرار می‌گیرند. اثر مشهود کار



**Fig. 7** Optical microscope images of a) annealed sample, b) and c) ironed sample

شکل 7 تصاویر میکروسکوپ نوری الف) نمونه آنیل شده، ب) و ج) نمونه اطوکشی شده

- مولفه‌های فشاری تنش باعث بسته شدن حفره‌ها و میکروتکرک‌ها در مواد تحت تغییرشکل می‌شود.
- کاهش ضخامت 80 درصد در فنجان‌های آلومینیومی در یک مرحله اطوکشی محدود شده قابل دستیابی است.
- روش اطوکشی محدود شده در مقایسه با روش‌های سنتی به فرآیندهای اضافی از قبیل آنیل بین پاسی و اطوکشی چند مرحله‌ای نیاز ندارد.

### 7- مراجع

[1] G. Faraji, M. M. Mashhadi, R. Hashemi, Using the finite element method for achieving an extra high limiting drawing ratio (LDR) of 9 for cylindrical components, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 3, No. 4, pp. 262-267, 2010.

[2] M. M. Moshksar, A. H. Kalvarzi, Ironing of aluminum cups, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 16, No. 4, pp. 461-470, 2001.

[3] D.F. Chang, J. E. Wang, Influence of Process Parameters on the Ironing of Deep-Drawn Cups, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, No. 4, pp. 699-705, 1997.

[4] M. Merklein, J. M. Allwood, B. A. Behrens, A. Brosius, H. Hagenah, K. Kuzman, K. Mori, A. E. Tekkaya, A. Weckenmann, Bulk forming of sheet metal, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 61, No. 2, pp. 725-745, 2012.

[5] T. F. Abdelmaguid, R. K. Abdel-Magied, M. Shazly, A. S. Wifi, A dynamic programming approach for minimizing the number of drawing stages and heat treatments in cylindrical shell multistage deep drawing, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 66, No. 3, pp. 525-532, 2013.

[6] F. Djanroodi, D. S. Abbasnejad, E. H. Nezami, Deep drawing of aluminum alloys using a novel hydroforming tooling, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 26, No. 5, pp. 796-801, 2011.

[7] A. Shirazi, K. Abrinia, G. Faraji, Hydro ironing: a novel ironing method with a higher thickness reduction, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 30, No. 1, pp.99-103, 2015.

[8] S.H. Kim, S.H. Kim, H. Huh, Tool design in a multi-stage drawing and ironing process of a rectangular cup with a large aspect ratio using finite element analysis, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 7, pp. 863-875, 2002.

[9] M. S. Ragab, H. Z. Orban, Effect of ironing on the residual stresses in deep drawn cups, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 99, No. 1-3, pp. 54-61, 2000.

[10] Z. Kampaš, B. Nardin, Improving workability in ironing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130-131, pp. 64-68, 2002.

[11] D. Delarbre, P. Montmitonnet, Experimental and numerical study of the ironing of stainless steel cups, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 91, No. 1-3, pp. 95-104, 1999.

[12] J. Tirosh, D. Iddan, M. Silvano, Hydrostatic Ironing—Analysis and Experiments, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 114, No. 2, pp. 237-243, 1992.

[13] M. Khodsetan, G. Faraji, K. Abrinia, A Novel Ironing Process with Extra High Thickness Reduction: Constrained Ironing, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 30, No. 11, pp. 1324-1328, 2015.

[14] S. S. N. Murty, V. C. Sekhar, Experimental and theoretical investigation of the flexible-mandrel ironing process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 41, No. 2, pp. 213-226, 1994.

[15] M. Schünemann, M. A. Ahmetoglu, T. Altan, Prediction of process

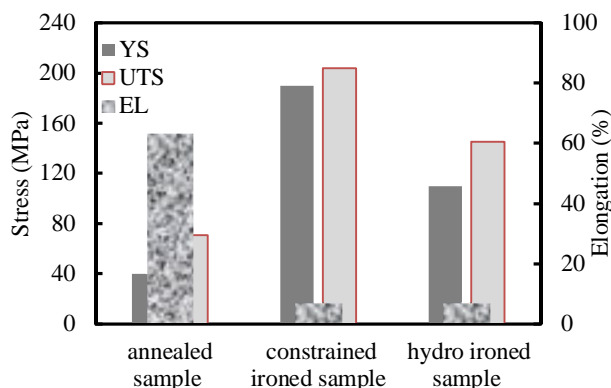


Fig. 9 Engineering stress-strain diagram of annealed sample, constrained ironed sample and hydro ironed sample

شکل 9 خواص مکانیکی نمونه آنیل شده، نمونه اطوکشی محدودشده و نمونه هیدرو اطوکشی شده

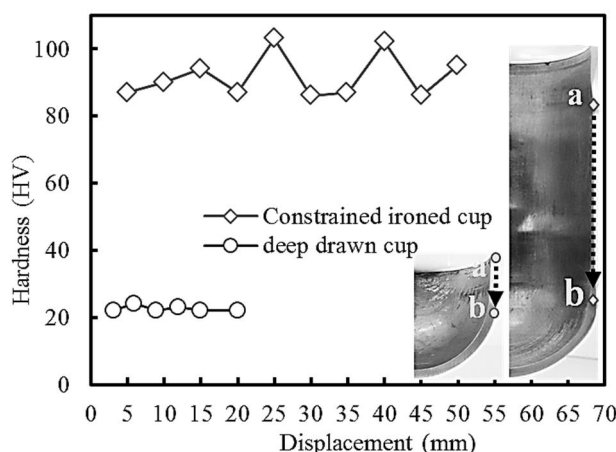


Fig. 10 Microhardness distribution in the deep drawn and ironed cup walls

شکل 10 توزیع سختی در دیواره فنجان کشش عمیق و اطوکشی شده

اطوکشی محدود شده تنش کاملاً فشاری در ناحیه شکل دهی حاکم می‌باشد که این مورد می‌تواند علت اصلی بهبود سختی نسبت به روش هیدرواطوکشی باشد. همچنین توزیع سختی در طول دیواره فنجان اطوکشی محدود شده در مقایسه با هیدرواطوکشی یکنواخت‌تر می‌باشد.

### 6- نتیجه گیری

اطوکشی محدود شده به‌عنوان یک تکنیک جدید برای تولید قطعات فنجانی شکل با دیواره نازک می‌باشد. این فرآیند قابلیت تولید قطعاتی مانند قوطی‌های نوشیدنی، قوطی‌های اسپری و قطعات مشابه را در یک مرحله دارد. در این فرآیند مواد فنجان در ناحیه شکل‌دهی بین سنبه و قالب محدود شده و تحت تنش فشاری قرار می‌گیرند و بدین ترتیب دستیابی به نسبت‌های بالایی از کاهش ضخامت امکان‌پذیر می‌باشد. نتایج حاصل از این پژوهش به‌صورت ذیل می‌باشد:

- نتایج شبیه‌سازی نشان داد که ضریب اصطکاک فرآیند اطوکشی مشابه روش‌های سنتی اطوکشی 0.08 می‌باشد.
- وضعیت تنش در ناحیه تغییر شکل در فرآیند اطوکشی محدود شده به‌طور کامل فشاری است درحالی که در روش اطوکشی سنتی وضعیت تنش کششی است.

- [19] W. F. Hosford, R. M. Caddell, *Metal forming: mechanics and metallurgy*, pp. 258. New York: Cambridge University Press, 2011.
- [20] Z. Kampuš, Ironing with Superimposed Force. *Proceedings of the 33rd International MATADOR Conference*, Manchester, United Kingdom, pp. 347-352, 2000.
- [21] B. Baudelet, B. Grange, Damage in deep-drawn and ironed can bodies in an aluminium alloy. *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 26, No. 3, pp. 375-379, 1992.
- [22] H. Takeuchi, Numerical simulation technology for lightweight aluminum can. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 38, No. 4, pp. 675-687, 1993.
- conditions in drawing and ironing of cans. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 59, No. 1-2, pp. 1-9, 1996.
- [16] S. K. Singh, V. Kumar, P. Prudvi Reddy, A. K. Gupta, Finite element simulation of ironing process under warm conditions. *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 3, No. 1, pp. 71-78, 2014.
- [17] D. Adamovic, V. Mandic, Z. Jurkovic, B. Grizelj, M. Stefanovic, T. Marinkovic, S. Aleksandrovic, An experimental modelling and numerical FE analysis of steel-strip ironing process. *Tehnički vjesnik*, Vol. 17, No. 4, pp. 435-444, 2010.
- [18] J. Courbon, Damage evolution in a compressive forming process: ironing of beverage cans. *Scripta Materialia*, Vol. 48, No. 4, pp. 1519-1524, 2003.